

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24240010

研究課題名(和文)自己組織型冗長設計による持続成長型情報ネットワーク構築手法

研究課題名(英文)An evolvable network design approach with network diversity

研究代表者

村田 正幸 (Murata, Masayuki)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：80200301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、トポロジーが有する構造の多様性を測る指標として残存次数の相互情報量に着目し、その有用性を評価する。評価の結果、ルーターレベルトポロジーの残存次数の相互情報量は約1.0となり、トポロジー構造の多様性が低いことがわかった。また、トポロジー構造の多様性を高めるネットワーク設計手法を提案し、単一ノード故障に対応するために求められる回線設備量を半減することが明らかとなった。また、回線容量の多様性を示す指標としての相互情報量指標を新たに導入し、相互情報量指標を高めることで、環境変化に対する適応性や拡張性を高めることを示した。

研究成果の概要(英文)：As environments surrounding the Internet become more changeable, a design approach that requires less equipment to scale up networks against the traffic growth under various environmental changes is needed. Here, we propose an evolvable network design approach where network equipment is deployed without predetermined purpose rather than for a preplanned purpose. We use mutual information on node degree to measure the topological diversity of networks, and maximize topological diversity in the network design by minimizing the mutual information. Evaluations show that, compared to networks with ad-hoc design method, networks constructed by our design approach can efficiently use the network equipment among various environments.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：情報ネットワーク ネットワーク設計 機能創発 生物システム 自己組織化

1. 研究開始当初の背景

これまでの情報ネットワーク構築手法に関する理論的研究においては、典型的な定式化として、トラフィック量やトポロジを既知として、所望の通信性能を与えるコスト最小化を目的関数とし、最適化問題をいかに効率よく解くかが主たる目的となっていた。ところが、実際の ISP の運用においては、そのような全体最適化が行われることはなく、回線ごとに利用率を測定し、それがしきい値を越えた時に回線を増強し、回線が既設のノード（ルータ）に収容できない場合にはノード増強を行うという極めてアドホックな方策をとっている。その結果、冗長性は確保されず、故障耐性は経路制御に依存し、通信性能の劣化を招くことになる。

一方、インターネットにおけるこれまでのサービスの展開を振り返ると、あるサービスが利用者の支持を受けて急激に立ち上がり、それを提供するサーバ近辺においてトラフィックが急激に増大するなど、従来の計画的設備設計手法は言うまでもなく、上述のアドホックな方策では対処しえない。ネットワーク構築の観点からはより詳細な測定トラフィックデータが必要になるが、たとえそのような詳細な測定データが得られたとしても、あくまで現時点での値であって、将来予測を行うことは困難であり、そのようなデータを用いたネットワーク設計は現実的ではない。

2. 研究の目的

ネットワーク上のトラフィックの短期的変動やネットワーク機器故障などの環境変動への適応性だけでなく、トラフィックの長期的増大に対するネットワーク構成機器の増設による規模拡大への適応性も備えた情報ネットワーク設計手法を確立する。生物システムにおける自己組織的冗長設計の知見を活用し、情報ネットワークの構成要素であるノードや回線、および、回線容量に関して少量の冗長性を付加し、構成要素間の連携によって実現される機能創発によってトラフィックの収容を図る。

3. 研究の方法

ノードや回線の構造的冗長性に着目し、自己組織的冗長性に基づく情報ネットワークの設計手法の概念を確立し、その有効性を検証する。そのために、相互情報量の概念を導入し、その最大化を図ることとする。それを用いて、既存の機器（ノードおよび回線）に、新たに設置する少量の冗長な機器を相互に連携させることによって機能創発を促せるよう機器の設置箇所を決定する手法を考案する。次に、相互情報量を拡張し、回線容量も考慮した自己組織化冗長性を取り扱う。以上によって、トラフィック量の増大や機器故障の環境変動への適応性、すなわち、故障耐性および成長耐性に優れた情報ネットワークの設計手法を確立する。

4. 研究成果

トポロジ構造の多様性

適応性や拡張性の高いネットワーク設計への適用を想定し、トポロジが有する構造の多様性を測る相互情報量を導入した。ここで言う構造の多様性とは、トポロジの一部のノード集合を取り出した際に、その集合の接続形態が多様であることである。

相互情報量は、情報理論における解釈では、確率変数 X, Y があった時、 Y を知ることで得られる X の情報量となる。相互情報量を、トポロジの構造の一部 (Y に相当) を知ることで得られる残りのトポロジの構造 (X に相当) の情報量と見立てることで、トポロジが有する構造の多様性を測る。

確率変数としては、残存次数を用いた。残存次数 k とはリンクを一本取り除いた時に、その片方に接続されていたノードの残り次数である。残存次数分布 $q(k)$ は、次数分布 $P(P_1, \dots, P_x, \dots, P_K)$ を用いて以下の式で表される。

$$q(k) = ((k + 1)P_k + 1) / \sum_k (kP_k)$$

ただし K はトポロジの最大次数である。残存次数の相互情報量 $I(q)$ は残存次数分布 $q = (q(1), \dots, q(i), \dots, q(N))$ を用いて式 (1) で表される。

$$I(q) = H(q) - H_c(q|q') \quad (1)$$

で表される。 $H(q)$ は残存次数のエントロピーであり、 $H_c(q|q')$ は残存次数の条件付きエントロピーである。いくつかのルーターレベルトポロジの相互情報量を求めたところ、表 1 の通りになった。また、比較のため、AT&T トポロジと同一のリンク数、ノード数の BA モデルで生成したトポロジと ER モデルで生成したトポロジの相互情報量を求めている。表 1 から、Verio 社を除くルーターレベルトポロジは残存次数の相互情報量が大きく、確率的に生成される BA トポロジや ER トポロジでは相互情報量が小さいことが分かる。ISP トポロジにおいて故障耐性向上のため、特定の接続パターンが繰り返し出現しているためであり、ルーターレベルトポロジが意図的に設計されていることに起因している。なお、Verio 社のトポロジの相互情報量は、Verio 社のネットワーク拡張の経緯によるものと考えられる。Verio 社は小規模な地域 ISP の買収を繰り返して規模を拡大したため、さまざま

表 1 ルーターレベルトポロジの相互情報量 : N

はトポロジのノード数

		N	H	H_c	I
ISP	Telstra	329	4.24	3.11	1.13
	Sprint	467	4.74	3.84	0.90
	AT&T	523	4.46	3.58	0.88
	Level3	623	6.04	5.42	0.61
	Verio	839	4.65	4.32	0.33
-	BA	523	4.24	3.98	0.26
	Random	523	3.22	3.15	0.07

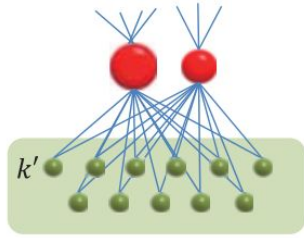


図 1 相互情報量が高いトポロジーが有する接続構造

また ISP の設計指針を内包し、結果として構造が多様になっている。相互情報量が高い ISP トポロジーでは、図 1 に示すトポロジー構造が頻出しており、ISP トポロジーがアドホックな方策によりネットワークを設計しているものと考えられる。すなわち、回線を特定のノードに集約し、冗長化のために、それらのノードへと連結している。

多様性を有する情報ネットワーク設計手法
 上記の評価結果にもとづき、トポロジーの構造を高める設計手法 (EVN 手法) を提案した。EVN 手法は残存次数の相互情報量を最小化し、トポロジー構造の多様性が高いネットワークを設計する手法である。EVN 手法では、1 ステップでノードを 1 個、相互情報量が最小となるようにリンクを m 本追加する。これを k ステップ繰り返し、トポロジー $G_k(V_k, E_k)$ を得る。具体的な設計手順は以下の通りである。

1. 初期トポロジーを $G_0(V_0, E_0)$ とする (V_0 はノード集合、 E_0 はリンク集合)
2. ノード 1 つ追加し、リンクを m 本追加する
- 2-a $G_{k-1}(V_{k-1}, E_{k-1})$ のエントロピー $H_{k-1}(q)$ を計算する。
- 2-b ノード w を $G_{k-1}(V_{k-1}, E_{k-1})$ に追加する。
- 2-c 新規ノード w が接続する m 個の既存ノードを選ぶ。この時、リンク接続後のネットワークの相互情報量が最小となる m 個のノードを選ぶ。
- 2-d 選ばれた m 個のノードと w 間にリンクを追加して、 $G_k(V_k, E_k)$ を得る。

m を 2 とし、追加ノード数 k (ステップ数 k) に対する相互情報量指標の変化を図 2 に示す。初期トポロジーは AT&T 社のトポロジーを用いており、ステップ 0 における相互情報量は 0.88 となっている。また、各ステップでは、次数分布のエントロピーが、初期トポロジーより大きくなるようリンク接続先を選択した。これは、次数分布のエントロピーがネットワークの故障耐性と相関があることが示されているためである。これにより、追加ノード数の増大に対して、次数分布のエントロピーは減少することなく相互情報量

が小さくなることわかる。

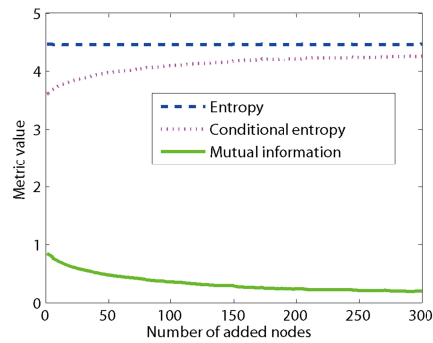


図 2 EVN 手法により設計したトポロジーのエントロピー、条件付きエントロピー、相互情報量

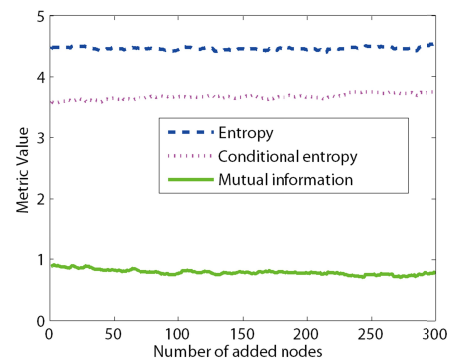


図 3 比較手法により設計したトポロジーのエントロピー、条件付きエントロピー、相互情報量

次に、EVN 手法によるトポロジーが備える自己組織的冗長性を評価し、少量の冗長な機器を相互に連携させることによって機能創発を促しているかを評価した。

比較手法として、アドホックな方策による設備追加、すなわちノードやリンク追加時点での最適化にもとづくネットワーク設計手法を用いた。具体的には、物理距離とホップ長の重み付和を最小化する FKP モデルにもとづくネットワーク設計手法を導入した。これ以外にも様々なネットワーク設計手法が考えられるが、FKP モデルはネットワーク設計の基本となる物理コスト制約とネットワーク通信品質向上を目指した手法であるため、これを用いることとした。

図 3 は、FKP に基づく設計手法でネットワークを成長させた時のエントロピー、条件付きエントロピー、相互情報量である。図 2 と同様に、AT&T トポロジーを初期トポロジーとし、追加ノード数を 300、各ステップで追加するリンク数を 2 とした。図 3 を見ると、エントロピー、条件付きエントロピーと相互情報量は追加ノード数 k に依存せず一定であることがわかる。これは FKP モデルの設計指針が距離指標を最小化したことによるものであり、トポロジーの多様性を高めるものではないことによる。300 ノード追加後のトポロ

ジ-の相互情報量は約 1.0 と高くなっていることから、FKP モデルに基づく手法を用いると、トポロジー構造の多様性が低くたもたれると言える。

提案設計手法の評価

まず、環境変動が生じていない下で、設計後に蓄積される回線設備量について評価した。設計過程では、単一ノード故障に備えて設備増強を行うことを想定した。ここで比較する回線設備量とは EVN 手法や FKP に基づく手法で同じ数のノードとリンクが追加されたネットワークの総回線設備量である。図 4 は、EVN 手法と比較手法それぞれの、ノード追加数に対する総回線設備量を示した結果であり、EVN 手法の方が比較手法より少ない設備増設量で構築され、かつ、その差はノード追加数が増えるとともに顕著になることがわ

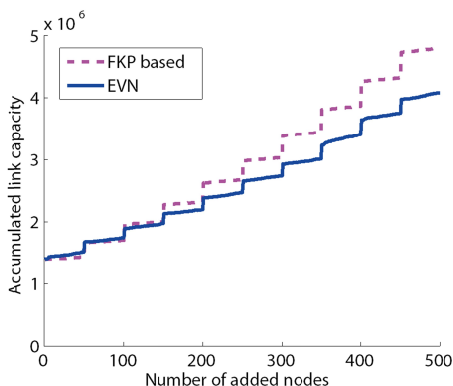
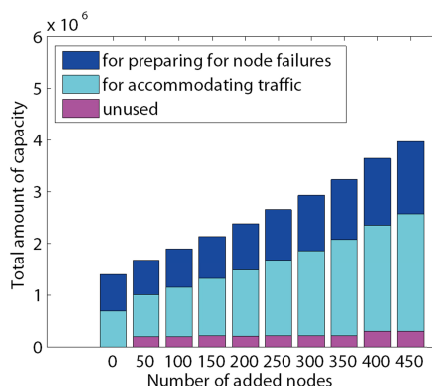


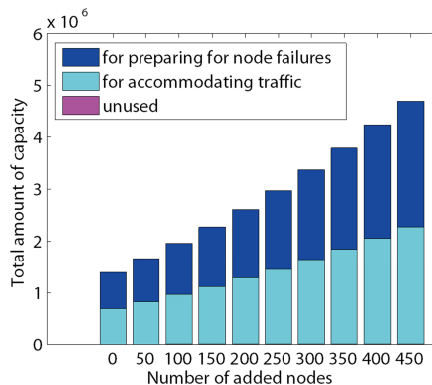
図 4 EVN 手法と比較手法により設計されたネットワークの総回線容量

かる。EVN 手法と比較手法の総回線容量の差を詳しく調査するため、トラフィックを収容するために使われる設備量、故障に備えて配置されている設備量、使われていない設備量を調査した。図 5(a) が EVN 手法、図 5(b) が比較手法の結果を示している。図 5(a) と図 5(b) から、故障に備えて配置されている設備量は EVN 手法の方が少ないことが分かる。これは、単一ノード故障時に必要となる設備配置のオーバーラップによるものであると考えられる。単一ノード故障時にトラフィックを収容するために追加すべき設備量を比較したところ、EVN 手法の方が多い。しかし、全パターンの単一ノード故障に備えるために必要となる設備量を比較したところ、EVN 手法の方が少ないことが明らかとなった。これは、EVN 手法により生成されたトポロジーが特定の環境に特化されていないため、あるノード故障に備えるために配置した設備量が他のノード故障で効率的に利用できたものと考えられる。

次に、想定外の環境変動時にどの程度の回線容量を再利用できるかを評価した。想定外の環境変動は定義することが困難な



(a) EVN 手法



(b) 比較手法

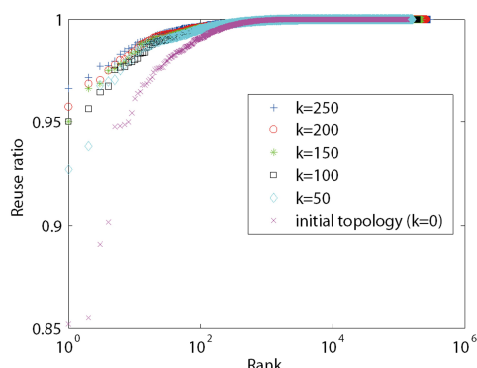
図 5 総回線設備の内訳：（紺：故障に備えて配置されている設備量、青：トラフィックを収容するために配置されている設備量、赤：使われていない設備量）

ため、設計時に想定した単一ノード故障と異なる 2 ノード故障を想定外の環境変動を考慮することとした。評価では、再利用可能割合 r_k という指標を新たに考案した。再利用可能割合 r_k は、以下の式により定義される。

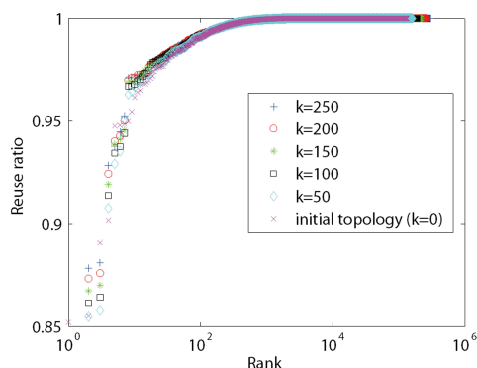
$$r_k = \frac{F_k^{reused}}{F_k^{new}}$$

ここで F_k^{new} は、新たな環境下で必要となる設備の総量を表しており、 F_k^{reused} が既に設計された設備量の中で再利用できる設備量を表している。なお、 k は初期トポロジーに追加したノード数である。 r_k は 0 から 1 の値を取り、 r_k が 1 の時、新たな環境下で生じるトラフィックを既に配置されている設備量ですべて収容できることを意味する。また、 r_k が小さくなるにつれ、既に配置されている設備量で収容できる割合が少ないことを意味する。EVN 手法、比較手法のそれぞれで規模成長したネットワークに対して、全パターンの 2 リンク故障時の r_k を求めた。EVN 手法の結果が図 6(a) で、比較手法の結果が図 6(b) である。それぞれの図では横軸が再利用可能割合のランクであり、再利用可能割合が低い順に並べている。ランク 1 から 200 までを見ると、 k が増加するにつれ、比較手法ではほぼ変化していないのに対し、EVN 手法では高くなっていることが分かる。これはノードが追加されネットワークの相互情報量が小さく

なるにつれ、EVN 手法の再利用可能割合が向上していることを示している。相互情報量が小さく、トポロジーが多様であるとノード故障時の迂回経路が特定のリンクに偏る傾向にないため、故障時に使われる設備量はネッ



(c) EVN 手法



(d) 比較手法

図 6 2 ノード故障時の再利用可能割合

トワーク全体に分散されている。それゆえ、重度の 2 ノード故障が生じたとしても、既に配置されている設備量を再利用することができる。一方で、トポロジーが多様でない、迂回経路が特定のリンクに偏るため、重度の 2 ノード故障が生じると再利用可能割合が低くなる。

本研究では、相互情報量最小化に基づいて、トポロジー構造の多様性を高める設計手法 EVN を提案した。EVN 手法が FKP モデルに基づく手法に比べて少ない設備量でネットワーク規模を拡張できることを示した。さらに、特定の故障環境のために用意された回線容量が他の事前設計されていない故障環境でも使えることを示した。以上のことから、トラフィック量の増大や機器故障の環境変動への適応性、すなわち、故障耐性および成長耐性に優れた情報ネットワークの設計手法が確立された。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- [1] T. Hirayama, S. Arakawa, K. Arai, and M. Murata, "Modularity structure and traffic dynamics of ISP router-level topologies," in Proc. of 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2012), October 2012.
- [2] L. Chen, S. Arakawa, and M. Murata, "Analysis of network heterogeneity by using entropy of the remaining degree distribution," in Proc. of International Conference on Advanced Communications and Computation (INFOCOMP 2012), pp. 84-89, October 2012. (Best Paper Award)
- [3] L. Chen, S. Arakawa and M. Murata, "Quantifying network heterogeneity by using mutual information of the remaining degree distribution," International Journal On Advances in Systems and Measurements, vol. 6, no. 1 and 2, pp. 214-223, June 2013.
- [4] Y. Nakata, S. Arakawa and M. Murata, "Understanding the evolution of the Internet topology through hierarchical analysis," in Proc. of European Conference on Complex Systems (ECCS 2013), September 2013.
- [5] Y. Takeshita, S. Arakawa and M. Murata, "Improving reliability of inter-connected networks through connecting structure," in Proc. of International Conference on Systems and Networks Communications (ICSNC 2013), October 2013.
- [6] L. Chen, S. Arakawa, M. Murata, H. Koto, N. Ogino and H. Yokota, "Designing an evolvable network with topological diversity," in Proc. of 2014 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), pp. 789-794, April 2014.

[学会発表] (計 3 件)

- [1] シンルー, 荒川伸一, 村田正幸, "[奨励講演] 残存次数の相互情報量にもとづくトポロジー構造の多様性が設備増設量に与える影響の評価," 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2012-157), pp. 93-98, January 2013.
- [2] 中田侑, 荒川伸一, 村田正幸, "フロー階層に着目したインターネットトポロジーの成長過程の分析," 電子情報通信学会技術研究報告 (PN2013-10), vol. 113, no. 175, pp. 13-18, August 2013.
- [3] 竹下結花, 荒川伸一, 村田正幸, "ネットワークの相互接続構造が大域的な信頼性に与える影響の比較評価," 電子情

報通信学会技術研究報告 (IN2013-40),
vol. 113, no. 140, pp. 25-30, July
2013.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-mura.ist.osaka-u.ac.jp/achievements/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

村田 正幸 (M. Murata)

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：80200301

(2)研究分担者

滝根 哲哉 (Tetsuya Takine)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00216821

荒川 伸一 (S. Arakawa)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：20324741

(3)連携研究者

なし